V 曲げされたアルミニウム板のリストレーション加工

畑中 伸夫*・コンソルショ ナモコ**・高倉 章雄***
飯塚 高志***・山口 克彦***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 1 (2006), pp. 45-50

Restoration process of V-bended aluminum sheet

Nobuo HATANAKA*, Consorcio S. NAMOCO Jr.***, Norio TAKAKURA***
Takashi IIZUKA*** and Katsuhiko YAMAGUCHI***

When the surface of the press product received local damage, the value of the product falls off largely. The reconstruction processing is carried out to return the surface of the product to an original shape and dimension. However, there are many difficulties in reconstruction processing, because the mechanical properties and thickness of the sheet are not homogeneity. Such reconstruction processing is examined little. But, that is important for environmental conservation. In this paper, such processing is called 'restoration processing'. The first, the various metal sheets were bent to the V form. Next, it was tried that this metal sheet is returned to an original flat plate. The research was carried out by the experiment and rigid plastic finite element method simulation. In the case of tension stress or compression stress which were greater than yield stress were applied the bent metal sheet, that did not return to flat plate. However, V-formed metal sheet returned to flat plate by using incremental bending method. When the work hardening exponent of the metal sheet was large, restoration processing becomes difficult.

(Received June 22, 2005 Accepted September 22, 2005)

Keywords: restoration, unbending, FEM simulation, aluminum sheet

1. 緒 言

近年、資源のリサイクルや省エネルギーなど環境負荷を軽減する加工技術が強く求められている¹⁾。塑性加工の分野では、熱間加工から冷間加工への移行、切りくずを出さないネットシェイプ成形への取組み、潤滑剤を使用しないドライ加工など多くの問題への検討がなされている。

金属板のプレス成形は多くの工業製品や家庭用品の製造に用いられており、主要な加工技術の一つである。板材プレス成形により製造される製品の形状・表面はきわめて滑らかに仕上げられている。しかし、表面に物が当たるなどして凹凸が生じると、製品としての価値が大きく低下する。このような損傷を受けた製品をもとの形状・寸法に修復する加工技術を確立することができれば、リサイクルを指向した環境負荷を軽減する加工技術として大変有益である²⁾。通常のプレス加工は多くの場合、材料特性や板厚が様な素材を対象に塑性加工するものであるが、修復加工は損傷場所によって材料特性や板厚が異なる不均一素材を出発材料とした逆方向の塑性加工である。従来、このような加工についてはほとんど検討されていないが、今後、修復加工に関する研究は、さらに重要性を増すと考えられる。

本研究ではこのような修復加工を『リストレーション加工』と呼ぶこととし、その基礎的研究としてV曲げを受けた板材

を元の平坦な板材に戻すリストレーション加工について実験^{3),4)}および剛塑性有限要素法シミュレーションにより検討した。リストレーションの方法として、単軸引張荷重を負荷する方法、平坦工具によって圧縮する方法について検討した。しかし、これらの方法によっては板材を完全に平坦化することができないことから、局所的に曲げモーメントを加えることによって平坦化する方法、および逐次曲げ戻し加工による方法について検討した。その結果、逐次曲げ戻し加工が板材を平坦化するのに最も有効であった。

2. V 曲げ加工の実験およびシミュレーション方法

2.1 実験およびシミュレーションの方法

2.1.1 実験方法

実験には、板厚 $t_0=2\text{mm}$ 、幅 $b=40\text{mm}$ 、長さ $l=70\text{mm}$ の軟質純アルミニウム板 (A1100P-O : Al-O と略記) を用いた。また、比較材料として軟鋼板 (SPCC)、ステンレス鋼板 (SUS304) を使用した。これらの材料の機械的性質を Table 1 に示す。なお、塑性係数 F および加工硬化指数 n は各材料の一軸引張試験によって得られた応力-ひずみ線図を次式で示す n 剰加工硬化則で近似した場合の F, n 値である。

$$\sigma = F\varepsilon^n \quad (1)$$

試験片を作製するために使用したV曲げ加工工具を Fig. 1

* 阿南工業高等専門学校機械工学科 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)。Anan National College of Technology (265 Minobayashi, Anan-shi, Tokushima 774-0017). E-mail: hatanaka@anan-nct.ac.jp

** 京都工芸繊維大学大学院 (京都市)。Graduate School, Kyoto Institute of Technology (Kyoto-shi, Kyoto).

*** 京都工芸繊維大学工学部 (京都市)。Kyoto Institute of Technology (Kyoto-shi, Kyoto).

Table 1 Mechanical property of materials

Materials	A1100P-O	SPCC	SUS304
Yield stress, Y (MPa)	27	103	290
Tensile strength, σ_B (MPa)	82.7	249	768
Total elongation, δ (%)	20	31	53
Plastic modulus, F (MPa)	175	476	1590
Work-hardening exponent, n	0.30	0.25	0.45
Vickers hardness, HV	27	93	203

Fig. 1 Punch and die dimensions.

に示す。加工中の荷重はダイス下に設置したロードセルによって測定し、押し込み深さはパンチと連動した変位計によって測定した。

2.1.2 シミュレーション方法

シミュレーションには剛塑性有限要素法を使用した。また、Table 1 に示した実験と同じ材料・機械的性質であると仮定し、試験片寸法も実験と同一とした。V曲げ加工およびリストラクション過程において、板材の変形は左右対称となることから、試験片の右側のみを解析の対象とした。また、変形は平面ひずみであると仮定し、材料は等方均質とした。

初期要素分割は、4 節点アイソパラメトリック要素を用い、1 辺の長さ 0.2mm、板厚方向に 10 要素、長手方向に 175 要素とし、総要素数 1750 である。パンチの押し込みは 1 ステップ当たり 0.01 mm とした。境界条件は中心軸上に位置する節点に x 方向の拘束を与え、パンチおよびダイスに接触した節点は、その工具の法線方向に拘束した。また、接線方向にはクーロン摩擦を想定し、摩擦係数 $\mu=0.1$ とした。

2.2 V 曲げ加工および変形後の試験片の特性

2.2.1 パンチの押し込みに伴う板材の V 曲げ加工

パンチとダイスによる V 曲げは、複雑な加工過程^{5),6)}をたどる。**Fig. 2** はパンチの押し込みに伴う板材の変形過程をシミュレーション結果、および実験結果を比較して示す。材料は Al-O である。押し込み深さ s が 0~10mm において、板材はパンチ先端部とダイス肩部で 3 点曲げを受ける。しかし、 s が 10mm 以上になると、ダイスと板材の接触点がダイス肩部から面上を中心方向に移動し、面接触するようになる。そして、 s が 12.5mm に達すると、板材のパンチ先端近傍部が圧縮変形を受ける。このため、曲げ荷重は、押し込み深さ $s=12.5$ mm まできわめて小さいが、12.5mm 以降は急激に増加した。

パンチの押し込みに伴う板材の変形について、比較材である SPCC・SUS304 の場合も同じ変形過程をたどり、荷重の変化に

(a) Simulation result

(b) Experimental result

Fig. 2 Deformation of sheet with punch penetration (Al-O). **Fig. 3** Distribution of Vickers hardness and equivalent strain of bent sheet.

ついてもまったく同じ傾向であった。また、実験結果と解析結果は、 $s=12$ mm までよい一致を示した。しかし、 $s=13$ mm において板材の変形は、シミュレーション結果と実験結果で差異が生じている。この原因はシミュレーションにおいて境界条件として「パンチおよびダイスに接触した節点は、その工具の法線方向に拘束した」ことにあると考えられる。

本研究においては、荷重が急激に増加する直前の押し込み深さ $s=12$ mm まで V 曲げ加工した板材をリストラクション用試験片として使用した。

2.2.2 V 曲げ加工後の硬さおよび相当塑性ひずみ分布

Fig. 3(a) はパンチの押し込み深さ 12.0mm まで V 曲げ加工した試験片の板厚断面におけるマイクロビッカース硬さ HV の分布を示す。図の横軸は V 曲げ加工前における板の曲げ中心からの初期位置 x を示している。硬さの測定は板厚中心お

(a) Restoration with tensile force (b) Reduction of residual height

Fig. 4 Variation of residual height and thickness strain with tensile stress increase.

よび中心から板の曲げ内外 0.5mm 間隔で 3 か所 (引張側, 中央, 圧縮側) 行った。板厚中心部の硬さは各材料とも加工前の硬さとほぼ同じであり, 加工硬化していない。一方, 曲げの引張側と圧縮側では加工硬化を生じ, 曲げ先端部に近づくほど硬さが増大している。

Fig. 3 (b) は V 曲げされた板材の相当塑性ひずみ分布を, シミュレーションにより求めた結果を示す。材料は Al-O である。曲げの引張側と圧縮側では, 曲げ部の先端に近づくほどひずみが急激に増加し, 板厚中心でも増加している。これは曲げ先端部では純粋な曲げ変形だけではなく, 長手方向に引張変形を受けるためである。相当塑性ひずみの分布は Fig. 3 (a) に示した硬さ分布と類似した定性的傾向を示している。

3. 引張荷重および圧縮荷重によるリストラクション

3.1 単軸引張によるリストラクション

V 曲げ変形を受けた板材をリストラクションする方法として, 試験片の両端に引張荷重を加えることによって, 曲げ部を平坦化することを試みた。引張荷重を加えた場合の曲げ戻し変形過程を Fig. 4(a) に示す。材料は Al-O である。荷重の増加に伴って, 中心部の曲げ角が減少して平らな形状に戻される。Fig. 4(b) は引張応力の増加に伴う曲げ部の残留高さ Δh と板厚ひずみ ϵ の変化を示す。応力 σ は降伏応力 (耐力) Y で除して無次元化して示している。残留高さ Δh は引張応力の増加に伴って急激に減少する。しかし, 引張応力が降伏応力の約 50% に達すると, 残留高さの減少率は低下し, 降伏応力以上の応力を負荷しても, 残留高さはほとんど減少せず板厚の減少が顕著になる。この結果から V 曲げ変形を受けた板材に単軸引張応力を負荷しても板材は平坦にならず, リストラクションすることはできなかった。

3.2 平坦工具の圧縮によるリストラクション加工

3.2.1 実験およびシミュレーション方法

リストラクションの方法として, V 曲げされた試験片を Fig. 5 に示す平坦工具で圧縮することによって, 平坦化することを試みた。また, シミュレーションにおける境界条件は前述の境界条件とともに, 上部平坦工具と材料間において, 節点に作用する荷重が負から正に変化した場合, および節点の下方への変位速度が工具の降下速度よりも速くなった場合には, 節点が工具の上側から離れたものとした。また, 下部平坦工具では節点の y 座標が負になった場合には, 工具と接触したものとし, 当該節点を y 方向に変位拘束した。

Fig. 5 Schematic diagram of flat tool used for restoration.

(a) Simulation result (b) Experimental result

Fig. 6 Deformation of unbending sheet with tool penetration depth (Al-O).

3.2.2 工具の押込みに伴う板材の曲げ戻し変形

平坦工具の押込みに伴う曲げ戻し過程の形状変化を, シミュレーション結果および実験結果を比較して Fig. 6 に示す。材料は Al-O である。工具の押込みに伴う板材の変形は, 単に曲げ角が順次減少する変形過程ではなく, 曲げ戻し過程に曲げ部の周辺部が逆反りを生じて, カモメ形状を経て平板に戻された。実験では試験片を降伏応力よりも強く圧縮したが, 工具を取り除くと試験片はスプリングバックを生じ, カモメ形状が残存した。

工具の押込みに伴う荷重の変化は, 初期には小さな値であるが, 工具の押込みが 21mm 以上になり, 上下工具と板材が全面接触すると, 実験結果および解析結果ともに急激に増加した。

3.2.3 形状変化 (曲率変化)

平坦工具によるリストラクションでは, Fig. 6 に示したように板材は複雑な変形過程を経て曲げ戻される。Fig. 7 は曲げ戻し過程の各部の曲率変化を示す。Fig. 7 (a) は実験による測定結果を示す。曲げ戻しの初期段階では, 工具の押込

Fig. 7 Variation of curvature with tool penetration depth (Al-O).

みに伴って曲げ変形を受けた部分全体の曲率が順調に減少していく。しかし、押し込み深さが8mmを超えると、曲げ部の周辺で逆反りのため曲率が負になる部分が現れ、押し込みの増加に伴って負の領域がさらに拡大した後、平板状に戻される。逆反りが生じる位置は $x=5\sim 18\text{mm}$ である。この原因は次のように考えられる。曲げ加工により曲げ部 $x=0\sim 10\text{mm}$ ではFig. 3に示したように材料が加工硬化し、変形抵抗が大きくなっている。一方、曲げ戻しによる曲げモーメントは、片持ちはりと同様な分布をするため、曲げ中心部で最大値となる。この変形抵抗の分布と曲げモーメントの分布の相互作用によって、 $x=5\sim 18\text{mm}$ の領域に逆反りが生じる。Fig. 7 (b) は解析による結果を示す。逆反りが生じる範囲が実験結果と比較すると少し広がっているが、実験結果と同じ変形経過をとる。また、実験では押し込み深さの増加に伴って曲げ先端部も徐々に戻されていったが、解析では押し込み深さ17mmまで曲げ先端部はほとんど変形せず、加工の最終段階で曲げ戻された。

3.3 残留高さに及ぼす加工硬化指数の影響

V曲げ変形を受けた板材を曲げ戻すために、平坦工具間で十分圧縮応力を加えたにもかかわらず、試験片を工具から取り外すと部分的に曲がり形状が残る、完全に平坦な状態に復元することはできなかった。この残留高さは材料によって異なる。そこで、各材料において曲げ戻し加工中の残留高さ Δh と圧縮応力の関係を調べた。結果をFig. 8に示す。いずれの材料においても残留高さ Δh は $\sigma/Y=0\sim 0.3$ で急激に減少するが、0.5より大きくしても Δh はほとんど減少しない。さらに、降伏応力より大きい圧縮応力を加えても Δh の減少に効果はなく、板厚が急激に減少した。

Fig. 9は、降伏応力に該当する応力 $\sigma/Y=1$ を加えたときの残留高さ Δh を各材料の加工硬化指数 n で整理して示す。加工硬化指数 n が大きい材料ほど残留高さ Δh が大きく、リストレーション加工性が悪いことがわかる。

4. 局所曲げ戻しによるリストレーション

4.1 局所曲げ戻しの原理

Fig. 10は曲げ変形を受けた板材の微小部分の側面および断面を模式的に示す。図中、 ds は中立面における微小部分の円弧長さ、 η は板厚方向の中立面からの距離、 ds' は中立面から η 離れた面の長さ、 ρ は曲率半径である。曲率を κ で表すと、曲げ変形を受けたとき中立面から η 離れた位置にお

Fig. 8 Variation of residual height and thickness strain with pressure stress.

Fig. 9 Influence of work hardening exponent on residual height.

Fig. 10 Schematic diagram of bending sheet.

るひずみ $\varepsilon(\eta)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} ds' &= (\rho + \eta) d\phi \\ \varepsilon(\eta) &= \frac{ds' - ds}{ds} = \frac{\eta}{\rho} = \kappa \eta \end{aligned} \quad (2)$$

また、曲げモーメントは軸力を0として、次のように表せる。

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma b \eta d\eta \quad (3)$$

一定の曲率に曲げられた板を平らな板に曲げ戻すには、曲げ変形を与えたときに生じたひずみを逆に与えればよいと考えられる。ここで、材料の塑性変形における相当応力 σ と相当ひずみ ε の関係を式(1)で示した n 剰加工硬化則で近似

Fig. 11 Equivalent stress and strain.

Fig. 12 Distribution of unbending moment.

する。また、材料は等方硬化すると仮定して、以下に曲げられた板材の曲げ戻しについて検討する。

曲げ変形を受けた板材は、Fig. 11(a) に示すように点A→B→Cと変形し、式(2)より $\epsilon_0 = \kappa\eta$ の塑性ひずみが残る。この曲げられた板を平坦に曲げ戻すためには、前述のようにこのひずみを逆に与える必要がある。曲げ戻し変形は等方硬化としているので、相当応力-相当ひずみ線図上ではFig. 11(b)の点C→B→D→Eの経路をたどる。この変形中の応力とひずみの関係を式で表すと、

$$\sigma = F(\epsilon + \epsilon_0)^n = F(2\kappa\eta)^n = 2^n F \kappa^n \eta^n \quad (4)$$

となる。また式(4)を式(3)に代入すると、

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma b \eta d\eta = \frac{F b h^{n+2}}{2(n+2)} \kappa^n \quad (5)$$

となる。

この結果から、いったん曲げ変形を受けた板を平らな板に曲げ戻すためには式(5)で求まる曲げモーメントを与えればよい。ここで、 F, n は材料特性値、 b, h は板材の形状であり、いずれも定数として扱うことができ、変数は曲率 κ のみとなる。すなわち、任意の曲率に曲げられた板を平らな板に曲げ戻すためには、曲げ部を曲率が一定とみなせる範囲で微小要素に分割し、各要素の曲率から求められる曲げモーメントを当該領域に与えればよい。

Fig. 12の実線はV曲げ加工した板材各部の曲率を測定し、この値を式(5)に代入することによって、平らな板材に戻すために必要な各部の曲げモーメントを求めたものである。

前章で述べた平坦工具によるリストラクション加工では、曲げを受けた試験片が両端と曲げ先端部の3点で工具と接触して曲げ戻されるため、破線のようなモーメントが板材に作用する。そのため、中心からの初期位置 x が7~35mmの範囲では、破線の方が上式から求めた値(実線)よりも大きく

Fig. 13 Local unbending tool and restoration process.

Fig. 14 Variation of curvature with tool penetration.

なり、その差が最も大きい $x=13$ mm近傍で逆反りが生じたものと考えられる。

4.2 局部逆曲げ工具を用いたリストラクション加工

Fig. 12の実線で示したモーメントを、板材の各部に正確に与えることは困難である。そこで、曲げ戻しに必要なモーメントを同図の一点鎖線で示す直線で近似してリストラクションした。この直線近似した曲げモーメントを与えるためには、図中に示すA点、B点を支点とする3点曲げ戻し加工をすればよい。図においてB点からA点まで板材に沿った長さは12mmであり、 x 軸方向の支点となる工具の幅は15mmとなる。

そこでFig. 13(a)に示す工具を用いて板に局部的に曲げ戻しを行った。変形過程をFig. 13(b)に示す。また、Fig. 14は曲げ戻しに伴う曲率分布の変化を示す。曲げの周辺部で逆反りを生じることはなく、曲げ部だけが局部的に戻された。しかし、中心部近傍では戻され過ぎてわずかに逆反りを生じた。これは、Fig. 1に示した供試材を作製するV曲げ加工に使用した工具のパンチ先端が $R=4$ の円弧状であり、V曲げされた試験片の中心部の曲率は一定となっているにもかかわらず、曲げ戻しのためにFig. 12の1点鎖線で示す直線的に分布するモーメントを加えたため、中心部に過剰なモーメントが作用したためである。

4.3 逐次曲げ加工によるリストラクション

局部逆曲げ工具を用いてリストラクションを行うには、試験片各部の曲率に応じた幅の工具を、使用しなければならない。そこで、Fig. 12の実線で示した曲げモーメントを局部的に正確に与えるために、Fig. 15に示すダイス間隔を自在に調節できる逐次曲げ加工工具を使用して、曲げ戻しを行った。

Fig. 15 Schematic diagram of incremental unbending tool.

Fig. 16 Incremental unbending process.

逐次曲げ加工工具による曲げ戻しの原理を Fig. 16 に示す。曲げ変形を受けた板を平板に戻すために必要なモーメントを、Fig. 16 (a) のように仮定する。まず、ダイス間隔を調節し、3点曲げによって Fig. 16 (b) の斜線部に示すモーメントを与え、曲げ戻し加工を行う。このとき、斜線部分の左半分では曲げ戻しに必要なモーメントと工具から加えられるモーメントが一致するので、完全に曲げ戻すことができる。しかし、右半分では工具から与えられるモーメントが不足するため変形が残る、加工後の必要モーメント分布は Fig. 16 (c) のように変化する。次に、Fig. 16 (c) のモーメント分布に注目し、Fig. 16 (d) の斜線部分に示すモーメントを与えて曲げ戻しを行う。その結果、加工後の必要モーメント分布は Fig. 16 (e) のように変化する。このような局所的な曲げ加工を順次繰返すことにより、最終的には Fig. 16 (f) に示すような平坦な板材に戻すことができる。

以上の方法を用いて実験を行った結果を Fig. 17 に示す。V 曲げされた板材は、ほぼ完全な平板にリストレージョンされている。さらに、Fig. 18 に示す任意の曲げ変形を受けた板材にも適用したが、図のように平板にリストレージョンすることが可能であった。

5. 結 言

プレス加工を受けた板材成形品が損傷を受けた場合に、これをもとの形状・寸法に修復するリストレージョン加工技術を確立するために、本論文ではリストレージョン加工の基礎的事項を明らかにした。実験およびシミュレーションにより V 曲げ変形を受けた金属板材を対象にして、これを元の形状・寸法に復元するために各種のリストレージョン加工を行い、以下の知見を得た。

(1) 降伏応力以上の単軸引張応力を負荷することによりリストレージョン加工を行ったが、加工後の板材は平坦に戻らず板厚の減少が大きくなった。

Fig. 17 Deformation of sheet with unbending process.

Fig. 18 Incremental unbending to certain curvature sheet.

(2) 平坦工具の圧縮によりリストレージョン加工を行うと、降伏応力の約半分の応力まで残留高さは急激に減少するが、降伏応力以上の応力を加えても、残留高さの減少には効果はなく、板厚が減少する。

(3) 板材各部の曲率に対応した曲げモーメントを加える逐次曲げ加工によって、板材は元の平坦な形状に復元された。また、板厚の減少も生じなかった。

(4) リストレージョン加工性は、加工硬化指数が大きくなると低下する。

(5) V 曲げ変形を受けた板を対象にして、剛塑性有限要素法によるリストレージョンの数値解析を行った結果、解析結果と実験結果はよく一致した。

参 考 文 献

- 1) 石丸辰治：塑性と加工，**44** (2003)，1145-1146.
- 2) 日本塑性加工学会：矯正加工，コロナ社，(1992)，17-21.
- 3) 山口克彦，高倉章雄，三枝清和：平成 11 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1999)，111-112.
- 4) 山口克彦，高倉章雄，三枝清和：第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集，(1999)，361-362.
- 5) 益田森治：薄板の曲げ加工，誠文堂新光社，(1958)，138-140.
- 6) 日本塑性加工学会：曲げ加工，コロナ社，(1995)，46-51.